

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

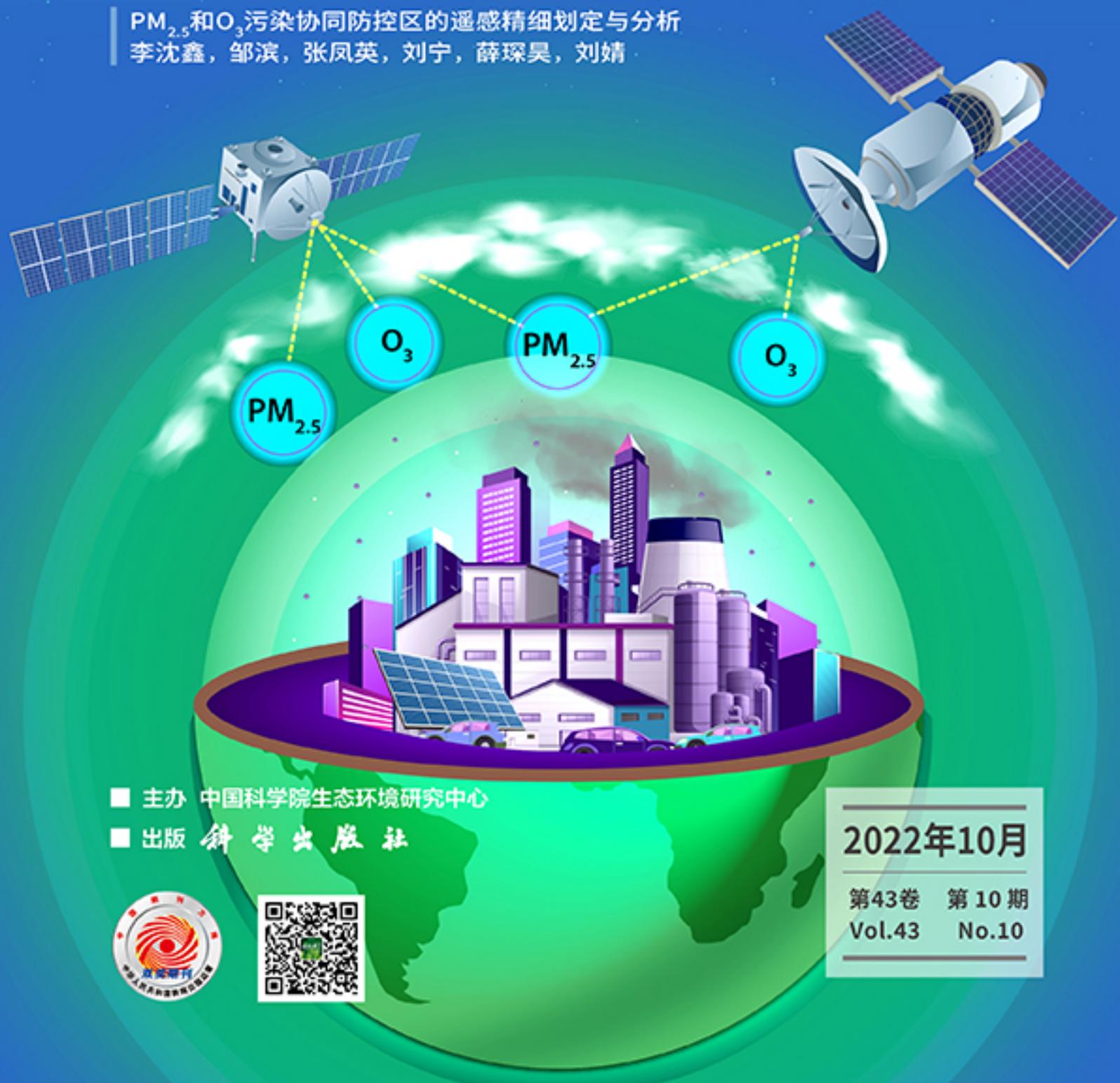
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 王雨吻, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞潼, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸烟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO₂@FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 陈凯鹏, 韦菊烟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征

胡志娥^{1,2}, 肖谋良², 丁济娜², 季剑虹², 陈剑平², 葛体达^{1,2}, 鲁顺保^{1*}

(1. 江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022; 2. 宁波大学植物病毒学研究所, 省部共建农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室, 宁波 315211)

摘要: 地膜覆盖是农业生产中保障粮食增产增收的重要措施。为明确长期地膜覆盖对农田土壤微生物群落结构特征的影响, 采集4个不同覆膜年限的农田土壤, 利用高通量测序技术分析土壤细菌和真菌群落结构变化, 探讨长期覆膜农田土壤中微生物群落的变化及其对微生物生态环境效应的影响。结果表明, 长期覆膜对土壤细菌多样性无显著影响, 但降低真菌多样性; 长期覆膜使土壤细菌酸杆菌(Acidobacteriota)和真菌被孢霉菌(Mortierellomycetes)物种丰度降低, 增加土壤放线菌(Actinobacteriota)物种丰度。长期覆膜可以使土壤富集细菌中的芽孢杆菌(*Bacillus*)和类诺卡氏菌(Nocardioideae), 及真菌中的肉座菌目(Hypocreales)和曲霉菌(*Aspergillus*)等有益微生物菌群。然而长期覆膜使土壤真菌共生网络变得简单而脆弱, 其关键物种仅有子囊菌门中的粪壳菌目(Sordariales)中的未知菌属一种, 因此对农田土壤生态环境带来潜在风险。本研究为深化了解长期覆膜对农田微生物生态环境效应的影响提供理论依据。

关键词: 地膜; 微塑料; 土壤微生物; 高通量测序; 分子生态网络

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4745-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202201237

Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching

HU Zhi-e^{1,2}, XIAO Mou-liang², DING Ji-na², JI Jian-hong², CHEN Jian-ping², GE Ti-da^{1,2}, LU Shun-bao^{1*}

(1. Collage of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-products, Institute of Plant Virology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Film mulching is an important practice to increase the yield and income in agricultural production. Soil samples were collected from four farmland sites with different mulching years to reveal the effect of long-term plastic mulching on characteristics of soil microbial community structure. In order to explore the long-term effect of soil microbial community change and its effect on the microbial ecological environment, high-throughput sequencing technology was used to analyze the changes in soil bacterial and fungal community structure. The results showed that long-term film mulching had no significant effect on soil bacterial diversity but decreased fungal diversity. Long-term film mulching decreased the abundance of Acidobacteriota and Mortierellomycetes and increased the abundance of Actinobacteriota. Long-term film mulching enriched the beneficial microbial communities such as *Bacillus*, Nocardioideae, *Aspergillus*, and Hypocreales in soil. However, long-term film mulching induced a simple and fragile soil fungal co-occurrence network pattern. The unidentified Sordariales under Ascomycota was the only key species in the fungal co-occurrence network, which resulted in potential risks to the ecological environment of the farmland soil. This study provided a theoretical basis for further understanding the effects of long-term film mulching on the ecological and environmental effects of microorganisms in farmland.

Key words: plastic mulch film; microplastic; soil microorganism; high-throughput sequencing; molecular ecological network

地膜覆盖由于其良好的保温保墒功能, 是农业生产中的一项有效增产措施, 在我国的农业生产中已被广泛推广和应用。我国从1978年开始引入地膜覆盖技术, 目前地膜的使用量已达到137.9万t·a⁻¹, 总覆盖面积为1762.8万hm², 约占农作物总播种面积的10.7%^[1], 且仍将长期处于较高水平, 预计到2025年, 我国地膜使用量将达到228万t, 覆盖面积将达到2340万hm²^[2]。地膜覆盖后可以改变土壤水热条件、空气和光照等环境因素, 进而导致土壤物理化学和生物学性状发生变化^[3]。另外, 由于地膜回收率过低, 当季回收率约不到60%, 大量地膜残留在农田中形成残膜^[4]。残膜在经过紫外光照射和自然风化后, 会形成大量塑料碎片或微塑料, 并进入到土壤当中, 影响土壤团粒结构、土壤容重、土壤水分运输和养分循环等, 进而影响农作物的生

长及土壤中动物和微生物的活性^[5~7]。以往的研究虽有关覆膜对作物的生长、土壤有机碳动态^[8]、土壤养分利用和微生物群落变化等方面的影响^[9~13], 但是仍缺乏对长期覆膜生产中农田土壤真菌和细菌群落结构变化及其对农田生态环境效应的影响方面的研究。

微生物是土壤养分循环的主要驱动者, 微生物群落结构和多样性的变化, 将影响土壤养分周转过程。土壤微生物群落的多样性是土壤质量的敏感指标, 反映土壤微生物群落的细微变化, 可以为土壤质

收稿日期: 2022-01-24; 修订日期: 2022-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107341, 31760136); 英国自然环境研究理事会全球挑战研究基金项目(NE/V005871/1); 宁波大学王宽诚基金项目; 江西师范大学研究生境内外访学基金项目

作者简介: 胡志娥(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤生态环境, E-mail: huzhie1996@163.com

* 通信作者, E-mail: luxunbao8012@126.com

量功能评价提供信息. 有研究表明, 地膜覆盖可以导致微生物多样性和丰富度显著增加^[14]. 也有研究表明, 塑料残膜碎片在农田土壤中的积累, 会加剧土壤中细菌群落的演替, 降低土壤细菌群落结构的稳定性^[15]. 此外, 地膜碎裂后产生的残膜和微塑料给土壤中的微生物群落提供一个独特栖息地, 在微塑料上定植的细菌群落在结构上与土壤的细菌群落有显著的差异, 塑料残膜上只富集特定的微生物菌群, 因此使微生物群落多样性降低^[16, 17]. 同时, 也有研究发现地膜覆盖降低了北方地区黑土土壤团聚体的稳定性和微生物相互作用^[18]. 然而, 土壤微生物受到各种非生物和生物因素的显著影响, 而覆膜期间引起的土壤水热气等条件的变化, 在休耕期或者揭膜后会消失. 因此, 探讨长期覆膜农田土壤真菌和细菌群落结构的变化, 对系统评估地膜覆盖对农田土壤生态效应的影响具有重要意义.

因此, 本研究选取 4 个不同覆膜年限且处于休耕期的农田土壤, 分析其微生物群落结构的变化, 探究其真菌与细菌群落结构特征及其内在联系, 通过揭示长期地膜覆盖土壤真菌和细菌群落的响应特征和关键物种的变化, 以期为探讨长期覆膜农业生产模式对农田土壤质量和可持续农业生产的影响提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

供试土壤分别来自 4 个不同覆膜年限的蔬菜农田, 分别位于湖北省荆州市江陵县秦市乡陆阳台村 (29.97°N, 112.61°E), 覆膜年限 < 5 a; 湖北省荆州市江陵县白马寺镇王市村 (30.15°N, 112.51°E), 覆膜年限 5 ~ 10 a; 湖北省咸宁市嘉鱼县新街镇马鞍山, 覆膜年限 10 ~ 20 a; 湖北省咸宁市嘉鱼县新街镇马鞍山, 覆膜年限 > 20 a. 4 个样地中地膜残留量分别为 0.69、1.30、2.02 和 0.28 g·m⁻².

于 2020 年 3 月, 在这 4 个研究区分别选取相邻的覆膜和不覆膜样地共 8 个, 每处样地选取 3 个田块作为重复, 共采集 24 个样品, 采用“S”形取样法采集耕作层 (0 ~ 20 cm) 的土壤. 将采集的土壤充分混合均匀后, 冷藏带回实验室, 保存于 -80℃ 用于土壤总 DNA 的提取. 具体土壤的施肥量、理化性质和土壤酶活等信息见文献^[19].

1.2 DNA 提取与扩增子测序

按照 Power Soil DNA 分离试剂盒 (MoBio, San Diego, USA) 的说明书介绍, 称取 0.5 g 土壤进行 DNA 提取, 而后使用 NanoDrop Spectrophotometer (Thermo Scientific, Wilmington, USA) 对提取的

DNA 进行浓度和纯度测定, 质量合格的 DNA 样品送至天津诺禾致源生物信息科技有限公司进行高通量测序, 使用细菌通用引物 515F (5'-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')^[20] 对细菌 16S rRNA 基因 V4 区域进行扩增, 使用真菌通用引物 its1 (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') 和 its2 (5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3') 对真菌 ITS1 区域进行扩增^[21]. 而后使用 QIIME 2 平台对原始数据进行数据拼接和质控^[22], 使用 q2 demux 插件进行质量过滤, 使用 DADA2^[23] 进行去噪处理并去除低质量序列和嵌合体, 然后采用 100% 相似进行聚类, 并且基于数据库 silva132 (<https://www.arb-silva.de/>)^[24] 进行细菌物种注释, 基于数据库 UNITE (<https://unite.ut.ee/>) 进行真菌物种注释. 为了获得细菌的 ASV 表, 又将注释为线粒体、叶绿体及古菌的 ASV 进行删除. 最后为了获得相同的测序深度, 使用 R4.1.0 的“vagen”包^[25] 进行抽平.

1.3 数据处理

用 IBM SPSS Statistics 22 软件对数据进行分析, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验不同覆膜年限土壤微生物的 α 多样性指数差异显著性, 采用独立样本 T 检验检测同一块地覆膜与不覆膜之间土壤微生物的 α 多样性指数的差异性. 主坐标分析 (PCoA) 使用 R4.1.0 基于 Bray-Curtis 变异系数完成, 用于确定不同覆膜年限及覆膜与不覆膜土壤微生物群落的差异, 并使用 R 语言的“vegan”包以及相似性分析 (ANOSIM) 确定分组检验是否有意义. 物种堆叠图由 R4.1.0 进行绘制. 线性判别分析 (LDA) 通过 LefSe (<http://huttenhower.sph.harvard.edu/galaxy>) 对属水平的细菌和真菌进行分析, 保留 LDA 得分 > 3.6, $P < 0.05$ 的物种. 使用 R4.1.0 的“psych”包对属水平的细菌和真菌基于斯皮尔曼相关性系数进行共生网络分析, 仅保留强正相关和负相关 (斯皮尔曼相关性系数, $r > 0.8$ 或 $r < -0.8$) 和统计学上显著相关 ($P < 0.01$) 的物种, 为避免偏差, 只保留大于样本数 60% 的物种进行分析. 共生网络分析的可视化使用 Gephi 0.9.2 进行绘图, 并进行拓扑参数的计算. 共生网络中节点的作用由模块间连通度 (P_i) 和模块内连通度 (Z_i) 表征, 根据模块间连通度 (P_i) 和模块内连通度 (Z_i) 对节点进行分类, 分为外围节点 ($Z_i < 2.5$ 且 $P_i < 0.62$)、连接器 ($Z_i < 2.5$ 且 $P_i > 0.62$)、模块枢纽 ($Z_i > 2.5$ 且 $P_i < 0.62$) 以及网络枢纽 ($Z_i > 2.5$ 且 $P_i > 0.62$), 采用 R4.1.0 软件的“vegan”程序包和“tidyverse”程序包进行微生物群落结构与土壤理化性质、微生物生物

量和土壤酶活性的相关性分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 地膜覆盖后农田土壤微生物群落多样性

表1为地膜覆盖后农田土壤细菌的 α 多样性指数,所有样本总共获得有效序列75 146条。结果表明,本土壤样本中细菌ASV覆盖度均大于99.9%,说明此次测序合理,能够反映地膜覆盖后农田土壤中细菌的种类和群落的真实情况。随着覆膜年限的增加,覆膜后土壤中细菌的丰富度随之增加,但是与其不覆膜的土壤相比,丰富度没有显著差异。本试验中,覆膜年限 <5 a的土壤细菌Shannon指数与5~

10、10~20和 >20 a的3个处理相比较,分别降低了4.95%、8.57%和6.80%。覆膜年限大于5 a的3个处理间土壤中细菌群Shannon指数没有显著差异,且4个覆膜年限的土壤中,除了覆膜5~10 a的土壤细菌Shannon指数显著低于不覆膜的,其他3组覆膜与不覆膜土壤相比,其细菌Shannon指数均无显著差异。本试验中,Chao1指数随着覆膜年限的增加,分别比覆膜 <5 a的处理增加了1.04、1.17和1.15倍。与不覆膜的土壤相比,覆膜5~10 a的土壤其细菌Chao1指数降低至不覆膜的90.48%,其他3组覆膜与不覆膜土壤中细菌物种数量均无显著差异。另外,ACE指数与Chao1指数的结果相类似。

表1 长期覆膜农田土壤细菌 α 多样性指数¹⁾

Table 1 Soil bacteria α diversity index in long-term mulched farmland

覆膜年限/a	处理	丰富度	Shannon 指数	Chao1 指数	ACE 指数	覆盖度/%
<5	不覆膜	2 161.0 \pm 49.1A	9.47 \pm 0.11A	2 163.9 \pm 52.0A	2 166.9 \pm 52.3A	99.9 \pm 0.0A
	覆膜	2 231.0 \pm 156.3Ab	9.60 \pm 0.42Ab	2 236.3 \pm 159.2Ab	2 240.1 \pm 159.2Ab	99.9 \pm 0.0Aa
5~10	不覆膜	2 564.0 \pm 62.1A	10.4 \pm 0.03A	2 564.3 \pm 62.6A	2 565.2 \pm 63.9A	99.9 \pm 0.0A
	覆膜	2 319.0 \pm 16.6Ab	10.1 \pm 0.03Ba	2 320.1 \pm 17.3Bb	2 323.1 \pm 17.9Bb	99.9 \pm 0.0Aa
10~20	不覆膜	2 590.7 \pm 42.6A	10.4 \pm 0.05A	2 590.8 \pm 42.6A	2 591.8 \pm 42.3A	99.9 \pm 0.0A
	覆膜	2 611.7 \pm 130.4Aa	10.5 \pm 0.05Aa	2 612.9 \pm 130.9Aa	2 615.2 \pm 131.8Aa	99.9 \pm 0.0Aa
>20	不覆膜	2 758.0 \pm 132.4A	10.5 \pm 0.07A	2 760.0 \pm 133.9A	2 762.8 \pm 134.8A	99.9 \pm 0.0A
	覆膜	2 570.3 \pm 24.9Aa	10.3 \pm 0.01Aa	2 571.0 \pm 25.8Aa	2 572.6 \pm 26.83Aa	99.9 \pm 0.0Aa

1) 数值为平均值 \pm 标准差($n=3$);不同大写字母表示同一块地不覆膜与覆膜间差异显著,不同小写字母表示不同覆膜样地间差异显著($P<0.05$),下同

表2为地膜覆盖后农田土壤真菌的 α 多样性指数,所有样本总共获得有效序列75 757条。结果表明,本土壤样本中真菌ASV覆盖度均大于99.9%,说明此次测序合理,能够反映地膜覆盖后农田土壤中真菌的种类和群落的真实情况。结果表明,覆膜5~10、10~20和 >20 a的处理的真菌丰富度分别降为覆膜 <5 a的82.52%、59.42%和58.90%;与其不覆膜的土壤相比,覆膜 <5 a的土壤中覆膜的真菌丰富度显著增加了1.26倍,其他3组覆膜土壤中真菌丰富度分别降低了32.63%、30.99%和32.70%。此外,与覆膜 <5 a的处理相比较,覆膜5~10、10~

20和 >20 a的土壤真菌Shannon指数分别降低33%~34.48%;与不覆膜的土壤相比,覆膜 <5 a的土壤中真菌Shannon指数显著增加了16.63%,其他3组覆膜土壤中真菌Shannon指数显著降低了20.60%~33.76%。Chao1指数随着覆膜年限的增加,土壤中真菌的Chao1指数比覆膜 <5 a的处理降低了17.45%~41.10%。与不覆膜的土壤相比,覆膜 <5 a的土壤其真菌Chao1指数显著增加了1.14倍,其他3组覆膜土壤中的真菌Chao1指数降低了32.56%、31.07%和32.72%。另外,ACE指数与Chao1指数的结果相类似。

表2 长期覆膜农田土壤真菌 α 多样性指数

Table 2 Soil fungal α diversity index in long-term mulched farmland

覆膜年限/a	处理	丰富度	Shannon 指数	Chao1 指数	ACE 指数	覆盖度/%
<5	不覆膜	258.0 \pm 15.6B	4.75 \pm 0.11B	258.1 \pm 15.7B	258.2 \pm 52.3B	99.9 \pm 0.0A
	覆膜	326.0 \pm 8.19Aa	5.54 \pm 0.18Aa	326.0 \pm 8.19Aa	326.1 \pm 8.11Aa	99.9 \pm 0.0Aa
5~10	不覆膜	399.3 \pm 8.02A	6.60 \pm 0.15A	399.3 \pm 8.02A	399.3 \pm 8.02A	99.9 \pm 0.0A
	覆膜	269.0 \pm 19.7Bb	5.21 \pm 0.19Ba	269.1 \pm 19.8Bb	269.3 \pm 19.8Bb	99.9 \pm 0.0Aa
10~20	不覆膜	280.7 \pm 11.2A	5.48 \pm 0.08A	281.2 \pm 12.0A	281.3 \pm 11.8A	99.9 \pm 0.0A
	覆膜	193.7 \pm 3.21Bc	3.63 \pm 0.25Bc	193.8 \pm 3.31Bc	193.9 \pm 3.38Bc	99.9 \pm 0.0Aa
>20	不覆膜	285.7 \pm 6.66A	5.68 \pm 0.11A	285.8 \pm 6.55A	285.8 \pm 6.49A	99.9 \pm 0.0A
	覆膜	192.0 \pm 7.81Bc	4.51 \pm 0.12Bb	192.0 \pm 7.83Bc	192.3 \pm 7.85Bc	99.9 \pm 0.0Aa

对不同覆膜年限中土壤微生物群落进行主坐标分析(PCoA)。结果表明,在细菌 β 多样性中[图1

(a)],PCoA1轴和PCoA2轴的贡献率分别为29.60%和16.06%,累计贡献率为45.66%。覆膜与

不覆膜、以及不同覆膜年限间细菌群落组成存在显著分异,说明覆膜处理和覆膜年限均显著改变土壤细菌的群落结构 (ANOSIM, $R = 0.3236$, $P < 0.001$). 真菌 β 多样性中 [图 1 (b)], PCoA1 轴和

PCoA2 轴的贡献率分别为 27.93% 和 16.24%, 累计贡献率为 44.17%. 与细菌结果相类似,地膜覆盖和覆盖年限均对真菌群落结构特征产生显著影响 (ANOSIM, $R = 0.3855$, $P < 0.001$).

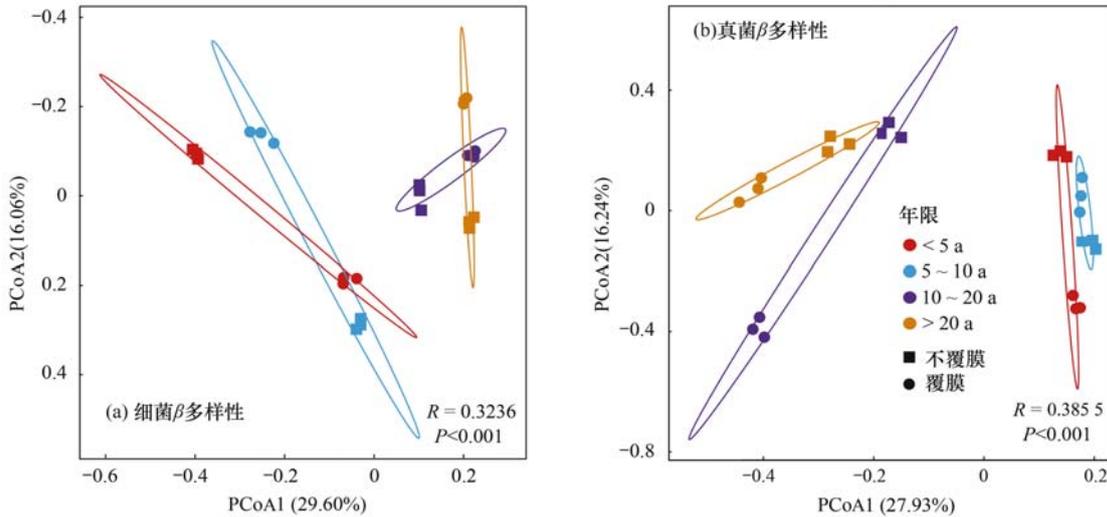


图 1 长期覆膜农田土壤微生物 PCoA 分析

Fig. 1 PCoA analysis of soil microorganisms in long-term plastic film mulching farmland soil

2.2 地膜覆盖对农田土壤微生物群落组成的影响

细菌和真菌的群落组成与地膜覆盖有关 (图 2). 在所有样本中, 细菌群落以变形菌门 (Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteriota)、酸杆菌门 (Acidobacteriota)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadota)、厚壁菌门 (Firmicutes)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 和拟杆菌门 (Bacteroidota) 为主 [占有所有细菌序列的 81.18% ~ 91.80%, 图 2 (a)]. 在覆膜 <5 a 和 5 ~ 10 a 时, 覆膜土壤中变形菌门相对丰度 (22.18% 和 32.26%) 低于不覆膜的土壤 (45.20% 和 35.12%). 覆膜 <5、5 ~ 10 和 >20 a 的

土壤中放线菌门的相对丰度 (51.14%、27.43% 和 17.39%) 均高于不覆膜土壤 (28.11%、16.41% 和 13.60%). 覆膜 5 ~ 10 a 和 >20 a 的土壤中酸杆菌门的相对丰度 (8.53% 和 10.77%) 均低于不覆膜的 (14.29% 和 14.79%). 在所有样本中, 真菌群落以子囊菌门中的子囊菌纲 (Sordariomycetes)、座囊菌纲 (Dothideomycetes)、散囊菌纲 (Eurotiomycetes)、盘菌纲 (Pezizomycetes) 和锤舌菌纲 (Leotiomyces), 被孢霉门的被孢霉菌纲 (Mortierellomycetes) 以及担子菌门的伞菌纲 (Agaricomycetes) 为主 [占有所有真菌丰度的 86.57% ~ 95.66%, 图 2 (b)]. 在覆膜 <5 a

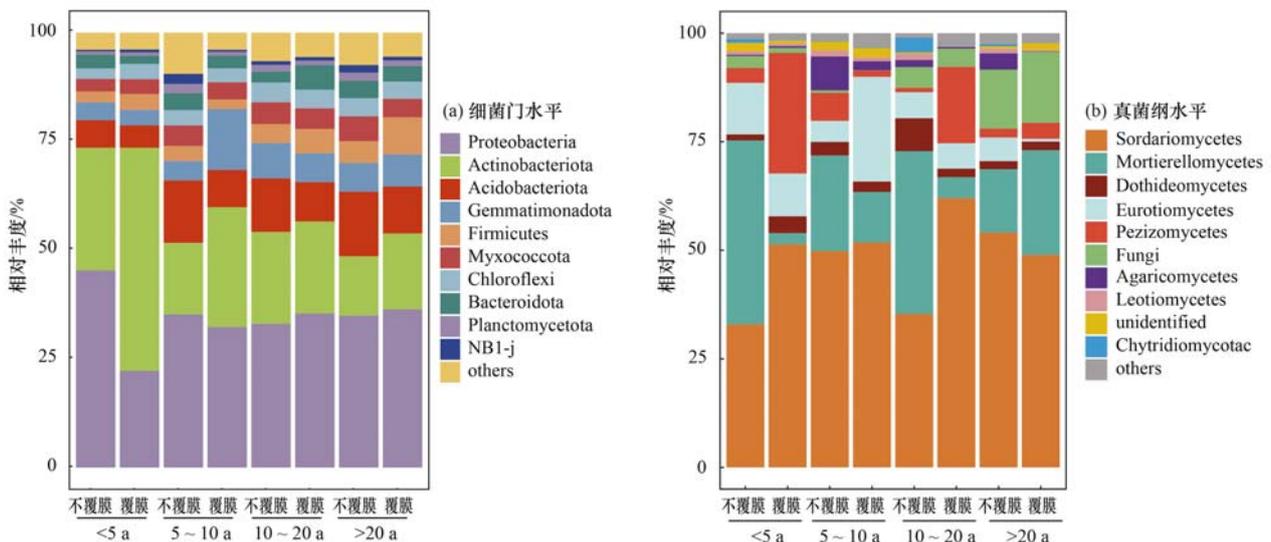


图 2 长期覆膜农田土壤微生物群落的分类组成

Fig. 2 Classification and composition of soil microbial community in long-term plastic film mulching farmland soil

和 10 ~ 20 a 的土壤中, 子囊菌纲的相对丰度 (51.39% 和 61.99%) 高于不覆膜土壤 (32.95% 和 35.36%)。在覆膜 < 5、5 ~ 10 和 10 ~ 20 a 的土壤中, 被孢霉属的相对丰度 (2.57%、11.63% 和 4.85%) 低于不覆膜土壤 (42.35%、22.03% 和 37.46%); 而在覆膜 > 20 a 以后, 被孢霉属的相对丰度 (24.10%) 高于不覆膜土壤 (14.56%)。

通过 LefSe 分析, 评估农田覆膜土壤与不覆膜土壤细菌和真菌的差异物种, 重点关注相对丰度排在前 50 的物种 (LDA 得分 > 3.6, $P < 0.05$)。结果表明, 覆膜土壤中显著富集的细菌物种也随着覆膜时间增加而减少, 覆膜 < 5 a 时显著富集 21 个细菌物种, 覆膜 5 ~ 10 a 和 10 ~ 20 a 均为富集 13 个物种, 覆膜 > 20 a 富集 8 个物种 (图 3)。

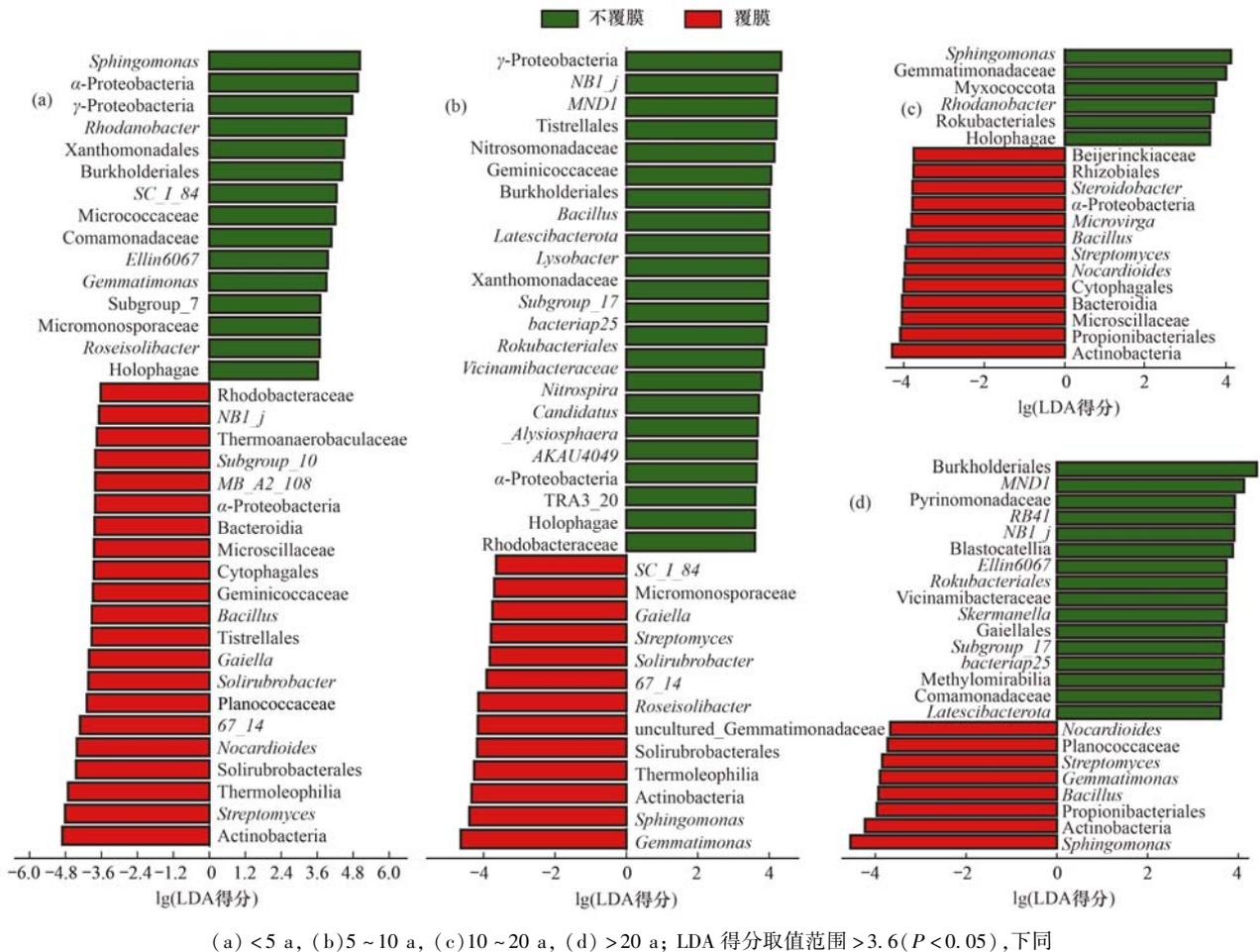


图 3 长期覆膜农田土壤细菌群落差异物种线性判别分析 (LDA)

Fig. 3 Bacterial biomarkers in long-term plastic film mulching farmland soil based on linear discriminant analysis (LDA)

覆膜 < 5 a 时在属水平显著富集 20 个真菌物种, 覆膜 5 ~ 10 a 时富集 17 个真菌物种, 在覆膜 10 a 以后, 真菌属水平富集的物种在覆膜 10 ~ 20 a 时为 27 个, 覆膜 > 20 a 时为 9 个, 说明覆膜年限的增加可以减少覆膜和不覆膜土壤中的差异物种。而在覆膜 10 ~ 20 a 时, 覆膜土壤中的显著富集的差异物种比覆膜 5 ~ 10 a 显著富集的差异物种要多, 这可能是样品区域不同引起的结果 (图 4)。

2.3 地膜覆盖对农田土壤微生物网络共生的影响

与不覆膜的土壤相比, 覆膜土壤中的细菌和真菌都形成各自独特的微生物网络 (图 5)。不覆膜土壤细菌共生网络中包含 735 个节点和 10 885 条边, 其中正相关 63.7%, 负相关 36.3%; 覆膜土壤细菌

共生网络中包含 791 个节点和 9 933 条边, 其中正相关 67.1%, 负相关 32.9% [图 5(a)]。说明覆膜土壤中细菌网络比不覆膜的土壤更为复杂, 但是细菌之间的联系较为疏远。此外, 通过共生网络的平均度和模块化程度也能证明这一结果, 不覆膜土壤细菌共生网络的平均度为 28.91, 模块化为 1.927, 均高于覆膜土壤 [平均度为 23.1, 模块化为 1.305, 图 5(a)]。不覆膜土壤真菌共生网络中包含 207 个节点和 1 257 条边, 其中正相关 72.9%, 负相关 27.1%; 覆膜土壤真菌共生网络包含 181 个节点和 1 439 条边, 其中正相关 75.0%, 负相关 25.0% [图 5(b)]。说明覆膜土壤中真菌群落变得简单, 但是联系更加紧密, 与细菌正好相反。这一结果也在共生网络的平

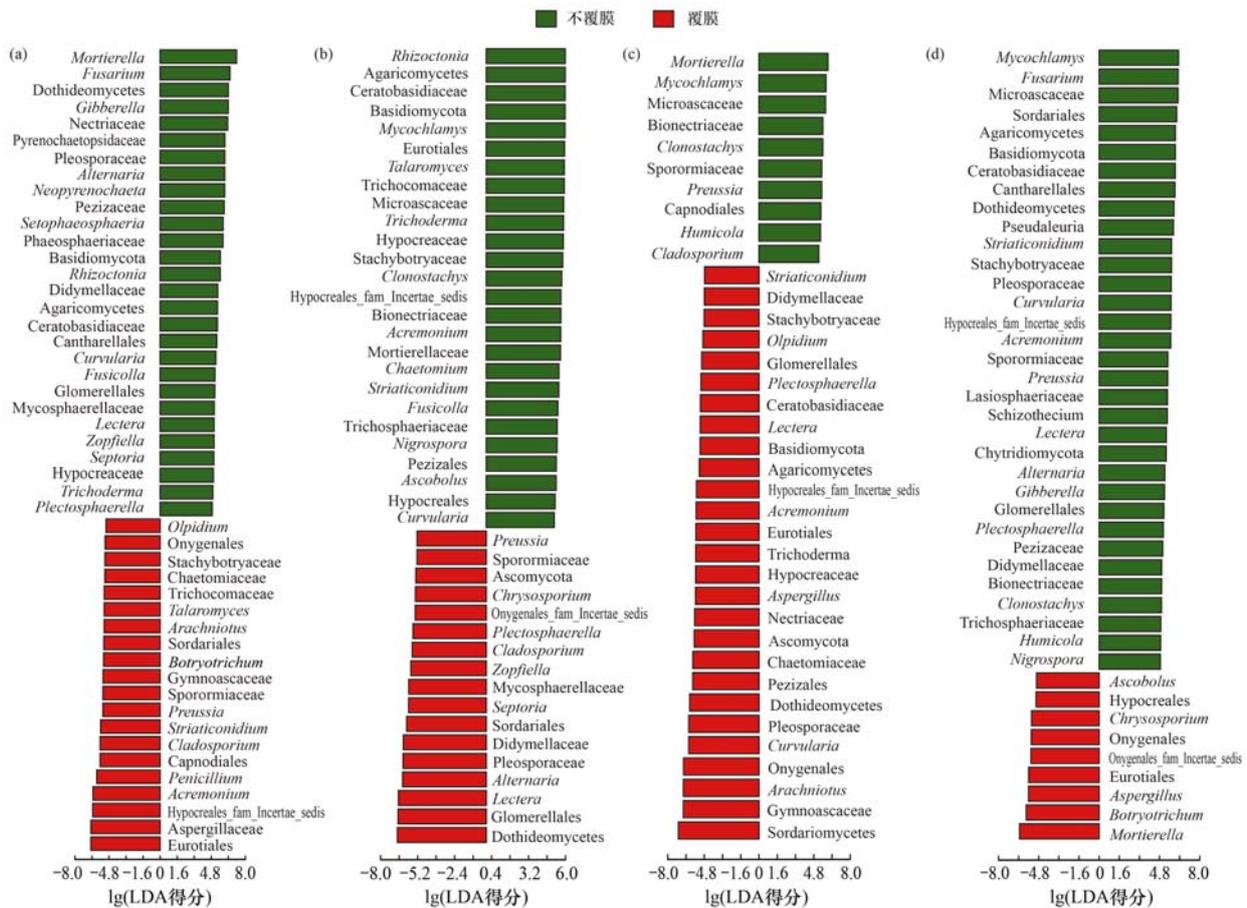


图4 长期覆膜农田土壤真菌群落差异物种线性判别分析(LDA)

Fig. 4 Fungal biomarkers in long-term plastic film mulching farmland soil based on linear discriminant analysis (LDA)

均度和模块化程度得到证明,覆膜土壤真菌共生网络的平均度(12.678)高于不覆膜的(12.178),模块化程度低于不覆膜的(覆膜:1.107,不覆膜:1.26)[图5(b)].

在微生物共生网络中,节点代表微生物群落中的物种,而不同节点的拓扑特征可以用来确定关键物种,一般将节点属性分为4种类型,包括外围节点($Z_i < 2.5$ 且 $P_i < 0.62$)、连接器($Z_i < 2.5$ 且 $P_i > 0.62$)、模块枢纽($Z_i > 2.5$ 且 $P_i < 0.62$)以及网络枢纽($Z_i > 2.5$ 且 $P_i > 0.62$),其中,网络枢纽的所有节点为该网络中的关键物种,而落在连接器和模块枢纽中的节点在模块间和模块内起重要作用.本试验结果表明,覆膜与不覆膜土壤的细菌及真菌的共生网络中的节点大部分为外围节点,且细菌和真菌网络中均无节点落在网络枢纽内(图6).在细菌网络中,不覆膜的土壤有5个节点落在模块枢纽,5个节点落在连接器内,而覆膜土壤中有6个节点落在模块枢纽,14个节点落在连接器内[图6(a)].将落在模块枢纽和连接器内的连通度最高的关键物种进行注释,不覆膜土壤中的主要关键物种为放线菌门中的赖氏菌属(*Leifsonia*)、高温脱硫弧菌属(*Thermodesulfovibrio*)和亚硝化螺菌属(*Nitrosospira*)

等,覆膜土壤中的关键物种为厚壁菌门中的厌氧杆菌属(*Anaerobacter*)和迈勒吉尔霉菌属(*Melghirimyces*)等.在真菌网络中,不覆膜的土壤有1个节点落在模块枢纽,4个节点落在连接器内,而覆膜土壤中仅有1个节点落在连接器内[图6(b)].将落在模块枢纽和连接器内的连通度最高的关键物种找出,不覆膜土壤中的关键物种为子囊菌门(Ascomycotac)、担子菌门(Basidiomycotac)和壶菌门(Chytridiomycota)中的多个物种,其中以柔膜菌目(Helotiales)连通度最高(39),覆膜土壤中的关键物种为子囊菌门中的粪壳菌目(Sordariales)中的未知菌属.以上结果表明,地膜覆盖后,提高了农田土壤中的细菌关键物种的数量,但是降低了真菌关键物种的数量.

2.4 影响农田土壤微生物群落结构的主要因子

以细菌和真菌的丰富度、Shannon指数和群落结构(主成分分析一轴)与土壤理化性质、微生物生物量及土壤碳氮磷循环相关酶活性进行相关性分析.如图7所示,细菌丰富度和Shannon指数及真菌丰富度和Shannon指数与土壤微生物量氮、微生物量磷、铵态氮、全氮、全磷和速效磷显著相关,与碳氮磷循环相关的酶活性无显著相关关系.细菌群落结

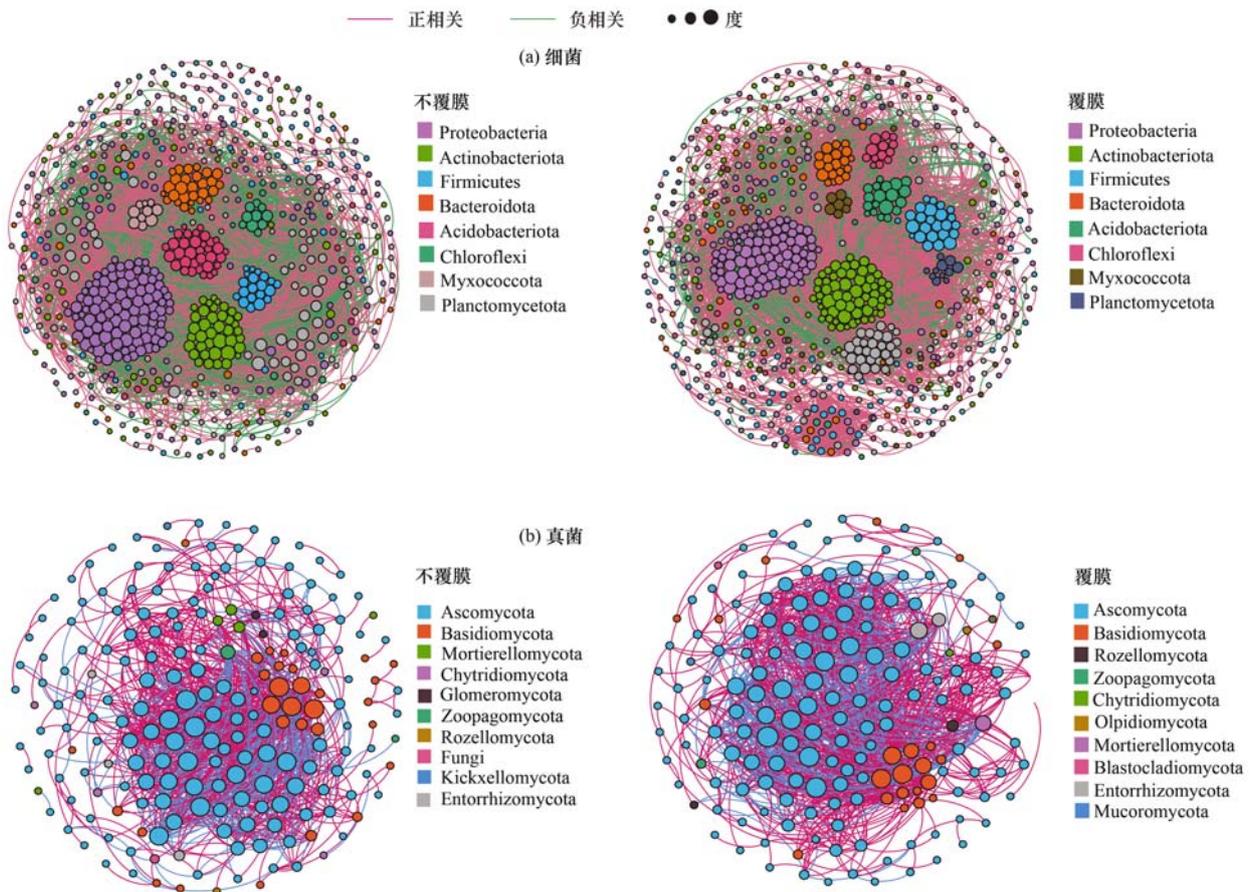
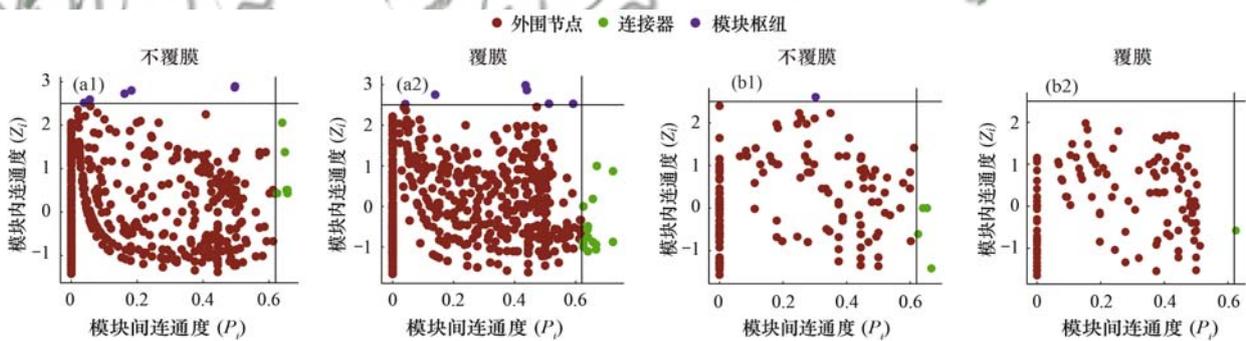


图5 长期覆膜农田土壤微生物共生网络模式

Fig. 5 Model diagram of microbial co-occurrence network in long-term plastic film mulching farmland soil



(a) 细菌, (b) 真菌; 横线表示模块内连通度 (Z_i) 为 2.5, 竖线表示模块间连通度 (P_i) 为 0.62

图6 长期覆膜农田土壤的微生物拓扑角色

Fig. 6 Topological role of microorganisms in long-term plastic film mulching farmland soil

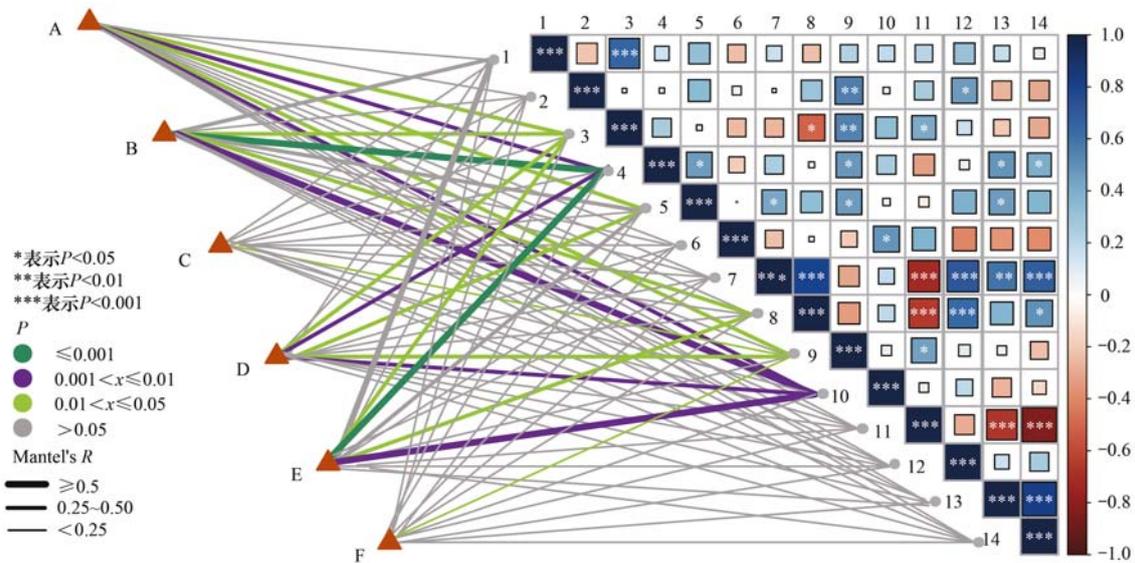
构和真菌群落结构与土壤理化性质、微生物生物量和酶活性均无显著的相关关系。

3 讨论

3.1 长期覆膜条件下微生物群结构和多样性的变化

由于地膜保温保墒等作用,长期地膜覆盖改变土壤理化性质,造成微生物生长和活性发生变化,使地膜覆盖的农田土壤微生物群落结构发生分异^[26].同时,长期地膜覆盖改变土壤中养分含量和生态酶计量比,改变微生物养分供需关系,使微生物群落结

构发生变化,改变微生物生存策略,从而获取养分维持繁殖和生长^[19].长期地膜覆盖下,大量薄膜碎屑残留在土壤中,可以为微生物提供特殊栖息生境,形成“微塑料际”热区^[7].然而,薄膜碎屑积累在土壤中,对土壤细菌群落的多样性影响并不显著^[26~28].本试验中,覆膜年限较短的土壤中真菌群落结构多样性显著增加,然而随着覆膜年限的增加,真菌群落结构多样性显著低于不覆膜土壤(表2).地膜覆盖的保温保墒等作用会加剧土壤呼吸,造成有机碳的损失,同时地膜覆盖可以显著促进作物生长,使根茬



A. 细菌丰富度, B. 细菌 Shannon 指数, C. 细菌群落结构, D. 真菌丰富度, E. 真菌 Shannon 指数, F. 真菌群落结构; 1. 微生物量碳, 2. 可溶性有机碳, 3. 微生物量氮, 4. 微生物量磷, 5. 铵态氮, 6. 硝态氮, 7. 有机碳, 8. 全氮, 9. 全磷, 10. 速效磷, 11. pH, 12. β -葡萄糖苷酶, 13. 几丁质酶, 14. 磷酸酶

图 7 微生物群落结构特征与土壤理化性质的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between soil properties and microbial community

和作物残体碳输入增加,加速土壤有机碳循环^[28].一般农作物残体以纤维素和半纤维素等为主^[29].多数植物残体的分解酶是由真菌产生,如磷酸酶、纤维素酶、果胶酶、木聚糖酶、淀粉酶和氧化还原酶等,作物残体输入后首先需要真菌分泌大量的酶进行分解,才能被其它微生物分解利用^[30].因此,作物残体输入的增加有利于真菌生长.另外,塑料残膜在土壤中积累,可以改变土壤理化性质,如促进土壤团聚体形成,增加土壤通气性,因此更有利于真菌的繁殖与生长^[31,32].由此造成在地膜覆盖前 5 a 内土壤真菌多样性的增加(表 2).覆膜超过 5 a 之后,由于长期驯化的结果,真菌群落多样性反而降低.然而,由于微生物的功能冗余性,多样性的降低并不意味着土壤功能性的降低.因此,尽管长期覆膜降低农田土壤真菌群落多样性,土壤氮磷等养分含量仍受真菌群落多样性的显著影响(图 7).在农作物生产过程中,覆膜可以促进作物生长和提高产量.然而,覆膜促进旱地土壤温室气体排放,增加全球增温潜势,同时促进土壤 N_2O 排放,使农田氮素损失增加^[29].残膜在农田中的积累,会阻碍土壤水分的运移;同时,由于水分的运移受限,土壤可溶性养分在土壤中传输也会受到阻碍^[33].这主要是由于塑料残膜在土壤中会形成物理隔离,最终会导致对作物根系生长及其对养分的接触性和利用效率的降低^[34].这种养分条件的改变势必对参与养分循环的微生物群落结构造成影响.另外,研究表明覆膜通过改变生态酶计量比,从而调节养分的有效性^[19].本研究结果显示,微

生物物种多样性与土壤养分显著相关,而生态酶活性受微生物群落结构的影响较小(图 7).表明长期覆膜条件下微生物群落结构和多样性的变化并不是调节土壤养分的主要因素,而是由于微生物的功能冗余性,通过调节土壤中的特异性功能微生物物种,可以实现对土壤养分元素周转的调控^[35].

3.2 长期覆膜条件下微生物对农田土壤生态环境的影响与潜在风险

一般来讲,微生物群落多样性指数越高,群落结构越复杂,稳定性越好^[5].覆膜土壤中细菌网络比不覆膜的土壤更为复杂,而真菌网络呈现相反结果.说明长期覆膜使土壤细菌群落具有更好的稳定性,抗胁迫能力较好.同时,微生物群落的高稳定性是实现生态功能的重要保障^[36].因此,在长期覆膜的农田土壤中,细菌在保障农田土壤功能过程中发挥重要作用.此外,微生物群落的个体根据其营养偏好和功能特性在自然生态系统中共存,而生物地球化学循环的多个过程需要在细菌和真菌等微生物的协同作用下完成.例如,复杂有机质分解中的水解酶和氧化酶,多数是由真菌分泌,将其分解为较简单的物质后,才能被细菌等其它微生物分解利用^[30].因此真菌群落关键微生物种群的减少可能会限制养分循环,从而引起覆膜土壤有效养分降低^[19].本研究还通过共存关系网络的拓扑结构的分析甄别微生物群落的关键物种.这些关键类群通过影响其他类群来改变微生物群落组成,并与其丰度无关^[37].因此,删除一个关键类群将导致微生物群落结构和功能的急

剧变化. 本研究中真菌共生网络中只筛选出 1 个关键物种, 表明长期覆膜使土壤真菌共生网络变得简单脆弱. 造成真菌共生网络变得简单化的原因, 还可能由于长期覆膜条件下, 地膜中众多协同污染物的释放及其在土壤中的积累, 如重金属和邻苯二甲酸酯等有机污染物, 对真菌种群的毒害作用引起^[38,39]. 而大多数细菌属于 r 策略者, 对环境适应能力较强, 所以其网络较真菌稳定^[40]. 由此可见, 长期覆膜和大量残膜对农田土壤生物区系的改变, 可能对农田土壤功能和环境造成不利影响.

长期覆膜可以改变土壤微生物的物种组成, 尤其是对土壤中主要优势菌群影响较大, 如降低酸杆菌 (Acidobacteriota) 的丰度, 提高放线菌 (Actinobacteriota) 的丰度 (图 2). 经过长期覆膜以及残膜积累致使某些特异性微生物类群的富集 (图 3 和图 4), 如细菌中厚壁菌门的芽孢杆菌 (*Bacillus*)、放线菌中的类诺卡氏菌 (*Nocardioideae*) 和真菌中子囊菌门的曲霉菌 (*Aspergillus*) 可以产生水解酶对塑料进行生物降解^[41]. 其中, 芽孢杆菌还可以通过减轻盐碱条件对结瘤表型的影响等作用, 促进作物的生长和产量的提升^[42]; 同时, 根际环境中的芽孢杆菌可以对真菌病原体产生拮抗作用, 抑制病原菌的生长和入侵, 降低作物病害的发生^[43]. 然而也有研究表明, 芽孢杆菌与生物胺的产生和耐酸腐败微生物的生长有关, 因此对农业生产和作物健康生长带来潜在风险^[44]. 此外, 有研究表明, 隶属于肉座菌目 (Hypocreales) 的很多种属为昆虫致病菌, 并被广泛用于林木及农作物有害昆虫病的防治^[45]. 因此覆膜对作物生长和农业增产增收有利, 但同时也会对农业生态系统造成一定的环境风险.

4 结论

农业生产中, 长期覆膜改变土壤微生物群落结构, 降低真菌物种多样性. 长期覆膜促进了细菌和真菌共生网络中物种间的协同作用, 降低了物种间的相互竞争. 长期覆膜农田土壤真菌共生网络中仅有一个关键物种, 使真菌群落和功能更容易受到干扰而发生改变. 因此, 尽管农业生产中覆膜可以提高经济效益, 但是不能忽视了其对农田土壤微生物生态环境的潜在风险.

参考文献:

- [1] 国家统计局农村社会经济调查司. 2020 中国农村统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] Qi R M, Jones D L, Li Z, et al. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: a critical review [J]. Science of the Total Environment, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134722.
- [3] de Souza Machado A A, Kloas W, Zarfl C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems [J]. Global Change Biology, 2018, **24**(4): 1405-1416.
- [4] 赵岩, 陈学庚, 温浩军, 等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望 [J]. 农业机械学报, 2017, **48**(6): 1-14.
- [5] Zhao Y, Chen X G, Wen H J, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, **48**(6): 1-14.
- [6] 蒋风华, 谢林青, 孙承君, 等. 常见塑料薄膜制品在 UV 作用下的性能变化特征 [J]. 科学通报, 2021, **66**(13): 1571-1579.
- [7] Jiang F H, Xie L Q, Sun C J, et al. The characteristic change of plastic film from common used packing bags under UV photodegradation [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, **66**(13): 1571-1579.
- [8] Liu Y, Huang Q, Hu W, et al. Effects of plastic mulch film residues on soil-microbe-plant systems under different soil pH conditions [J]. Chemosphere, 2021, **267**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128901.
- [9] Hu X, Gu H, Wang Y, et al. Succession of soil bacterial communities and network patterns in response to conventional and biodegradable microplastics: A microcosmic study in Mollisol [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **436**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129218.
- [10] Xiao M L, Shahbaz M, Liang Y, et al. Effect of microplastics on organic matter decomposition in paddy soil amended with crop residues and labile C: a three-source-partitioning study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126221.
- [11] 王秀康, 李占斌, 邢英英. 覆膜和施肥对玉米产量和土壤温度、硝态氮分布的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(4): 884-897.
- [12] Wang X K, Li Z B, Xing Y Y. Effects of mulching and fertilization on maize yield, soil temperature and nitrate-N distribution [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(4): 884-897.
- [13] Liu X J, Wang J C, Lu S H, et al. Effects of non-flooded mulching cultivation on crop yield, nutrient uptake and nutrient balance in rice-wheat cropping systems [J]. Field Crops Research, 2003, **83**(3): 297-311.
- [14] Zhang H Y, Liu Q J, Yu X X, et al. Effects of plastic mulch duration on nitrogen mineralization and leaching in peanut (*Arachis hypogaea*) cultivated land in the Yimeng Mountainous Area, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, **158**: 164-171.
- [15] An T T, Schaeffer S, Li S Y, et al. Carbon fluxes from plants to soil and dynamics of microbial immobilization under plastic film mulching and fertilizer application using ¹³C pulse-labeling [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **80**: 53-61.
- [16] Wu C C, Ma Y J, Wang D, et al. Integrated microbiology and metabolomics analysis reveal plastic mulch film residue affects soil microorganisms and their metabolic functions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **423**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127258.
- [17] Dong W Y, Si P F, Liu E K, et al. Influence of film mulching on soil microbial community in a rainfed region of northeastern China [J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-08575-w.
- [18] Wang J, Huang M K, Wang Q, et al. LDPE microplastics significantly alter the temporal turnover of soil microbial communities [J]. Science of the Total Environment, 2020, **726**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138682.

- [16] Zhang M J, Zhao Y R, Qin X, *et al.* Microplastics from mulching film is a distinct habitat for bacteria in farmland soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **688**: 470-478.
- [17] Miao L Z, Wang C Q, Adyel T M, *et al.* Microbial carbon metabolic functions of biofilms on plastic debris influenced by the substrate types and environmental factors [J]. *Environment International*, 2020, **143**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106007.
- [18] Luo S S, Wang S J, Zhang H J, *et al.* Plastic film mulching reduces microbial interactions in black soil of northeastern China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, **169**, doi: 10.1016/J.APSOIL.2021.104187.
- [19] 胡志娥, 肖谋良, 王双, 等. 地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1649-1656.
- Hu Z E, Xiao M L, Wang S, *et al.* Effects of plastic mulch film on soil nutrients and ecological enzyme stoichiometry in farmland [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1649-1656.
- [20] Walters W, Hyde E R, Berg-Lyons D, *et al.* Improved bacterial 16S rRNA gene (V4 and V4-5) and fungal internal transcribed spacer marker gene primers for microbial community surveys[J]. *mSystems*, 2015, **1**(1), doi: 10.1128/mSystems.00009-15.
- [21] Tedersoo L, Tooming-Klunderud A, Anslan S. PacBio metabarcoding of Fungi and other eukaryotes: errors, biases and perspectives[J]. *New Phytologist*, 2018, **217**(3): 1370-1385.
- [22] Bolyen E, Rideout J R, Dillon M R, *et al.* Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2[J]. *Nature Biotechnology*, 2019, **37**(8): 852-857.
- [23] Callahan B J, McMurdie P J, Rosen M J, *et al.* DADA2: high-resolution sample inference from Illumina amplicon data [J]. *Nature Methods*, 2016, **13**(7): 581-583.
- [24] Medonald D, Price M N, Goodrich J, *et al.* An improved Greengenes taxonomy with explicit ranks for ecological and evolutionary analyses of bacteria and archaea [J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(3): 610-618.
- [25] Dixon P. VEGAN, a package of R functions for community ecology[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2003, **14**(6): 927-930.
- [26] Huang Y, Zhao Y R, Wang J, *et al.* LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112983.
- [27] 李雨泽, 胡迎春, 宋端朴, 等. 地膜覆盖和秸秆还田对黄土高原土壤细菌群落结构的影响[A]. 见: 中国农学会耕作制度分会2018年度学术年会论文摘要集[C]. 哈尔滨: 中国农学会耕作制度分会, 2018. 23.
- [28] Yu Y X, Zhang Y X, Xiao M, *et al.* A meta-analysis of film mulching cultivation effects on soil organic carbon and soil greenhouse gas fluxes [J]. *CATENA*, 2021, **206**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105483.
- [29] 单玉华, 蔡祖聪, 韩勇, 等. 淹水土壤有机酸积累与秸秆碳氮比及氮供应的关系[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(6): 941-947.
- Shan Y H, Cai Z C, Han Y, *et al.* Accumulation of organic acids in relation to C:N ratios of straws and N application in flooded soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, **43**(6): 941-947.
- [30] Baldrian P, Valúšková V. Degradation of cellulose by basidiomycetous fungi[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2008, **32**(3): 501-521.
- [31] de Souza Machado A A, Lau C W, Kloas W, *et al.* Microplastics can change soil properties and affect plant performance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(10): 6044-6052.
- [32] Zhao Z Y, Wang P Y, Wang Y B, *et al.* Fate of plastic film residues in agro-ecosystem and its effects on aggregate-associated soil carbon and nitrogen stocks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125954.
- [33] Li Y Q, Zhao C X, Yan C R, *et al.* Effects of agricultural plastic film residues on transportation and distribution of water and nitrate in soil[J]. *Chemosphere*, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125131.
- [34] Hu Q, Li X Y, Gonçalves J M, *et al.* Effects of residual plastic-film mulch on field corn growth and productivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138901.
- [35] Banerjee S, Kirkby C A, Schmutter D, *et al.* Network analysis reveals functional redundancy and keystone taxa amongst bacterial and fungal communities during organic matter decomposition in an arable soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **97**: 188-198.
- [36] Zhou J Z, Deng Y, Luo F, *et al.* Functional molecular ecological networks[J]. *mBio*, 2010, **1**(4), doi: 10.1128/mBio.00169-10.
- [37] 马泊泊, 黄瑞林, 张娜, 等. 秸秆生物质炭对根际土壤细菌-真菌群落分子生态网络的影响[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(4): 964-974.
- Ma B B, Huang R L, Zhang N, *et al.* Effect of straw-derived biochar on molecular ecological network between bacterial and fungal communities in rhizosphere Soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(4): 964-974.
- [38] Li Q L, Zeng A R, Jiang X, *et al.* Are microplastics correlated to phthalates in facility agriculture soil? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **412**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125164.
- [39] Dong Y M, Gao M L, Liu X W, *et al.* The mechanism of polystyrene microplastics to affect arsenic volatilization in arsenic-contaminated paddy soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **398**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122896.
- [40] Zhou Y F, Liu X N, Wang J. Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.133798.
- [41] Yuan J H, Ma J, Sun Y R, *et al.* Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **715**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136968.
- [42] Han Q, Ma Q, Chen Y, *et al.* Variation in rhizosphere microbial communities and its association with the symbiotic efficiency of rhizobia in soybean [J]. *The ISME Journal*, 2020, **14**(8): 1915-1928.
- [43] Ongena M, Jourdan E, Adam A, *et al.* Surfactin and fengycin lipopeptides of *Bacillus subtilis* as elicitors of induced systemic resistance in plants[J]. *Environmental Microbiology*, 2007, **9**(4): 1084-1090.
- [44] Dunière L, Sindou J, Chaucheyras-Durand F, *et al.* Silage processing and strategies to prevent persistence of undesirable microorganisms [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, **182**(1-4): 1-15.
- [45] Rios-Velasco C, Pérez-Corral D A, Salas-Marina M Á, *et al.* Pathogenicity of the hypocreales fungi *beauveria bassiana* and *metarhizium anisopliae* against insect pests of tomato [J]. *Southwestern Entomologist*, 2015, **39**(4): 739-750.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, Ji Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)